

М 417495

Московское
ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
им. Н.Э.Баумана



На правах рукописи

ШКОЛА Виктор Васильевич

УДК 536.248.2

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛО- И
МАССООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ
ВЫНУЖДЕННОГО ПОТОКА ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ
НА ПЛАСТИНЕ

ОГ.04.14 - Теплофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1984

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Никитин В.М.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Юдаев Б.Н.

доктор технических наук
Макаров А.М.

Ведущее предприятие – указано в решении Ученого Совета

Защита диссертации состоится "28" мая 1984 г.
в "15-30" часов на заседании Специализированного Совета
К.053.15.08 "Энергетические установки" в Московском высшем тех-
ническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Ле-
фортовская набережная, д. I, корпус факультета "Энергомашиностро-
ение".

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью учреждения
Москва, 2-я Бауманская ул., д. 15, корпус 30
секретарю Совета

С диссертацией
им. Н.Э.Баумана.

Автореферат

Ученый секретарь
Специализированного Совета
К.053.15.08

M417495

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Процессы конденсации пара из парогазовой смеси (ПГС) широко используются в элементах энергетических установок, технологических процессах химической и пищевой промышленности, системах опреснения соленой воды и т.д. Существующие в настоящее время инженерные методики расчета тепломассообмена (ТМО) при конденсации ПГС несовершенны, так как расчетные зависимости включают в себя неизвестные величины: параметры ПГС на границе раздела фаз. Расчет по этим зависимостям производится методом последовательных приближений, а проанализировать влияние различных факторов на ТМО по ним затруднительно. Экспериментальные исследования конденсации пара из ПГС, в основном, посвящены определению средних характеристик ТМО, которые не дают полной картины протекания процесса. Во многих же случаях при проектировании конденсационной аппаратуры требуется знание локальных характеристик ТМО. Для расчета ТМО при конденсации пара из ПГС применяются также результаты экспериментальных и теоретических исследований пограничных слоев с отсосом. Использование этих результатов затрудняется тем обстоятельством, что они проведены в отсутствие пленки конденсата; динамическое воздействие потока ПГС на пленку не учитывается. Таким образом, изучение ТМО при конденсации пара из ПГС является актуальным, как в практическом, так и научном плане.

Настоящая работа посвящена исследованию локальных характеристик ТМО при конденсации пара из вынужденного потока ПГС. Течение в пленке конденсата и в пограничном слое ПГС — ламинарное.

Цель работы заключается в разработке инженерной методики расчета ТМО при конденсации пара из ПГС на произвольно ориентированной пластине, позволяющей вести расчет непосредственно по заданным параметрам потока и температуре охлаждаемой поверхности, а также в соответствующей экспериментальной проверке указанной методики путем проведения исследований локальных характеристик ТМО.

Научная новизна. Разработана методика расчета ТМО при пленочной конденсации пара из вынужденного потока ПГС на произвольно ориентированной пластине. Впервые предложены зависимости, позволяющие рассчитать температуры межфазной поверхности: а) при конденсации ПГС произвольного состава — по трансцендентному

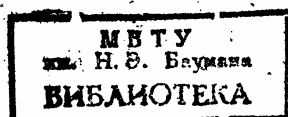
I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1417495

Школа В.В. Разработка метод



уравнению; б) при конденсации паров воды из паровоздушной смеси (ПВС) – по явной аналитической зависимости. Применимость разработанной методики подтверждается экспериментальным исследованием локальных характеристик ТМО, которое проводилось при помощи датчиков теплового потока (д.т.п.) батарейного типа.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты проведенного исследования могут быть использованы для расчета ТМО при проектировании конденсационных устройств теплоэнергетики, химической промышленности, систем опреснения соленой воды и т.п.

Реализация результатов работы. Диссертационная работа связана с выполнением хозяйственного НИР и результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на III научно-техническом семинаре "Современное состояние теплофизического приборостроения" (г. Киев, 1982), на IU Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (г. Москва, 1983), на Всесоюзной научной конференции "Проблемы энергетики теплотехнологии" (г. Москва, 1983), на Московском межвузовском семинаре (г. Москва, 1983).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано пять печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы. Работа содержит 131 страницу, включая 88 страниц текста, 32 рисунка, 4 таблицы, список литературы на 7 страницах, состоящий из 67 наименований работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель работы, дана её краткая аннотация и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ имеющихся в литературных источниках данных по исследованию ТМО при конденсации пара из ПВС. Проведенный анализ показал, что трудность в расчетах ТМО при конденсации ПВС, по сравнению с конденсацией чистого насыщенного пара, заключается в определении параметров ПВС (T_{δ}, m_{δ})

на границе раздела фаз. При конденсации чистого пара обычно пренебрегают межфазным сопротивлением и принимают температуру равной температуре насыщения соответствующей заданному давлению пара. Параметры ПГС на границе раздела фаз могут быть найдены из решения полной системы дифференциальных уравнений, описывающих задачу конденсации пара из ПГС. Аналитическое решение такой системы не представляется возможным. Численные же решения о применении ЭЦВМ, хотя и возможны, требуют много времени при составлении и отладке программы (Спэрроу и др., Дэнни и др.). Решение таким опосредованным способом проводится для каждого конкретного случая и его трудно проанализировать с точки зрения влияния отдельных факторов на процесс тепломассообмена.

Использование для практических расчетов результатов исследований пограничных слоев с отсосом (Гриффитс, Мередит, Иглиш, Эммонс, Лен), затрудняется тем обстоятельством, что в этом случае рассмотрены только процессы, протекающие в парогазовом слое в отсутствие пленки конденсата, а поперечная скорость w_δ в расчетах ТМО при конденсации является величиной неизвестной.

Анализ литературных данных показал также, что все используемые в настоящее время инженерные соотношения включают в себя неизвестные величины T_δ , m_{δ} , P_δ (Колберн, Сполдинг, Леонтьев). Расчет ТМО при применении этих соотношений возможен только методом последовательных приближений с использованием таблиц термодинамических свойств.

На практике для расчета ТМО при конденсации пара из ПГС широко применяются эмпирические соотношения, полученные на основе обработки экспериментальных данных методами теории подобия (Берман и др.). Неудобство пользования ими заключается в их многообразии для различных параметров процесса и способов его организации. Кроме того расчетные соотношения также включают в себя неизвестные величины P_δ и m_{δ} и расчет по этим соотношениям приходится вести методом последовательных приближений.

Таким образом, анализ опубликованных работ по исследуемой проблеме показал, что ТМО при конденсации пара из ПГС требует дальнейшего изучения. В связи с этим задачи настоящего исследования сформулированы следующим образом:

1. Разработать методику расчета ТМО при конденсации пара из

ПГС, позволяющую вести расчет непосредственно по заданным параметрам потока и температуре охлаждаемой поверхности.

2. Провести сравнение результатов расчетов, полученных на основе разработанной методики, с литературными данными, полученными при расчете с помощью ЭЦВМ.

3. Экспериментально проверить правильность разработанной методики в широком диапазоне изменения параметров процесса.

4. Проанализировать с помощью разработанной методики влияние различных факторов на ТМО при конденсации пара из ПГС.

Вторая глава посвящена разработке методики расчета ТМО при конденсации пара из вынужденного потока парогазовой смеси на произвольно ориентированной пластине. При разработке методики принимались обычные допущения Нуссельта, а также считалось, что:

1) Процесс конденсации аналогичен процессу отсасывания из пограничного слоя;

2) Существует приближенная аналогия между совместно протекающими процессами трения, тепло- и массообмена;

3) Теплота, поступающая в пленку конденсата со стороны пограничного слоя ПГС определяется теплотой фазового перехода;

4) Рассматриваемый пограничный слой ПГС — однородный.

При принятых допущениях локальное значение теплового потока определяется по формуле:

$$q = j \cdot \tau = \frac{\lambda_e (T_\delta - T_w)}{\delta} \quad (1)$$

Неизвестными величинами в правой части соотношения (1) являются: толщина пленки конденсата δ и температура межфазной поверхности T_δ . Расчетное значение δ было получено из решения уравнения движения и уравнения баланса массового расхода жидкости для пленки конденсата в следующем виде:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{4 \lambda_e X}{\rho_e W_\infty} \frac{B'}{\Psi'}}}{\sqrt{0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{4 g A x \sin \varphi}{\sqrt{\infty}^2 M} \left(\frac{B'}{\Psi'} \right)^2}} \quad (2)$$

Кутателадзе и Леонтьев получили решение интегрального соотношения импульсов на проницаемой пластине. Согласно принятым допущениям это решение записывается в виде:

$$\psi'_{T,D} = \frac{(1 + \theta_{T,D}/3,35)^{4/3}}{\sqrt{(1 + \theta_{T,D}/3,35)^{4/3} - \theta_{T,D}}}; \quad \theta'_{T,D} = \frac{\theta_{T,D}}{\sqrt{(1 + \theta_{T,D}/3,35)^{4/3} - \theta_{T,D}}} \quad (3)$$

Соотношения (3) позволили аппроксимировать комплекс θ'/ψ' с точностью 1,5% в области значений $1,18 \leq \psi' \leq 15$, $0,1 \leq M \leq 10$:

$$\frac{\theta'}{\psi'} = \left(0,94 + \frac{0,57}{M}\right)^{-\frac{3}{4}}; \quad \text{где: } M = \frac{C_{pe} A (T_\delta - T_w)}{z_e p_{ze}}; \quad A = \left(\frac{p_e \eta_e}{p_\infty \eta_\infty}\right)^{1/2} \quad (4)$$

Для нахождения температуры межфазной поверхности воспользуемся известным выражением относительного закона массообмена:

$$\psi'_D = \frac{Nu_D (1 - m_{1\delta})}{Nu_{D0}} \quad (5)$$

где:

$$Nu_D = \frac{j \cdot X}{\rho_\infty (m_{1\infty} - m_{1\delta}) D}; \quad Nu_{D0} = 0,332 Re_x^{1/2} Sc^{1/3} \quad (6)$$

Соотношения (3) не позволяют установить явную аналитическую зависимость между ψ'_D и θ'_D . Поэтому для дальнейших преобразований используем:

$$\psi'_D = \frac{(\theta'_D)^{2,7} + 1,75 \theta'_D}{(\theta'_D)^{1,7} + 0,37} \quad (7)$$

Выражение (7) аппроксимирует зависимость (3) с точностью 14% при $\psi'_D \geq 1,23$, $\theta'_D \geq 0,3$.

Вводим обобщенное массосодержание:

$$B = \frac{\theta'_D}{\psi'_D} = \frac{m_{1\infty} - m_{1\delta}}{1 - m_{1\delta}} \quad (8)$$

Воспользовавшись уравнением состояния идеального газа и уравнением Клайперона-Клаузиуса можно получить:

$$m_{1\delta} = \left[e^{\frac{z_1}{R_1} \left(\frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T_{\infty}} \right)} \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{m_{1\infty}} - 1 \right) - \frac{R_1}{R_2} + 1 \right]^{-1} \quad (9)$$

После подстановки (1), (2), (6)-(9) в (5) и соответствующих преобразований имеем:

$$\begin{aligned} S_c^{2/3} \frac{M}{0,664} \left(\frac{\Psi'}{g'} \right)^{0,5} \left\{ 0,5 + \left[0,25 + \frac{4gAx \sin \varphi}{w_\infty^2 M} \left(\frac{g'}{\Psi'} \right)^2 \right]^{0,5} \right\}^{0,5} = \\ = \left\{ \frac{1,38}{1 - m_{1\infty}} \left[1 - \frac{e^{\frac{z_1}{R_1} \left(\frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T_{\infty}} \right)} \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{m_{1\infty}} - 1 \right) - \frac{R_1}{R_2} + 1}{e^{\frac{z_1}{R_1} \left(\frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T_{\infty}} \right)} \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{m_{1\infty}} - 1 \right) - \frac{R_1}{R_2} + 1} \right] - 1,75 \right\}^{1/7} \quad (10) \end{aligned}$$

В полученном уравнении (10) имеется единственная величина — температура T_δ . Разрешив это уравнение относительно T_δ и определив толщину пленки конденсата по соотношению (2), тепловой поток можно легко рассчитать по выражению (1).

Используя полученные выше результаты и некоторые дополнительные преобразования, для конкретной ПТС можно получить явную аналитическую зависимость между T_δ и заданными параметрами процесса. Для дальнейшего рассмотрения выбрана ПТС в виду того, что она является наиболее часто встречающимся рабочим телом в различных устройствах. Исходным соотношением является уравнение (10). Все преобразования проводятся с целью получения квадратного уравнения относительно комплекса:

$$z = 1 - \frac{T_\delta - 273}{T_{\infty} - 273} \quad (11)$$

В левой части уравнения (10) производим следующие замены:

$$\left\{0,5 + \left[0,25 + \frac{49Ax \sin \varphi}{W_{\infty}^2 M} \left(\frac{\theta'}{\psi'}\right)^2\right]^{0,5}\right\}^{0,5} \approx \left[0,95 + 1,31 \left(\frac{49Ax \sin \varphi}{W_{\infty}^2 M}\right)^{0,45} \left(\frac{\theta'}{\psi'}\right)^{0,9}\right]^{\frac{1}{4,7}} \quad (I2)$$

Точность аппроксимации (I2) не превышает (7%) в диапазоне:

$$0 \leq \frac{49Ax \sin \varphi}{W_{\infty}^2 M} \left(\frac{\theta'}{\psi'}\right)^2 \leq 4 \cdot 10^6$$

$$\left[\frac{M}{0,664} \left(\frac{\theta'}{\psi'}\right)^{0,5}\right]^{1,7} \approx 0,11 + 2,48 M^{1,6}$$

Точность выражения (I3) 8% в диапазоне $0,12 \leq M \leq 15$.

$$(T_{\delta} - T_w)^{1,6} \approx (T_{\infty} - T_w)^{1,6} (1 - 1,54 X^{0,9} + 0,51 X^{1,8}) \quad (I4)$$

$$(T_{\delta} - T_w)^{1,25} \approx (T_{\infty} - T_w)^{1,25} (1 - 1,05 X^{0,9}) \quad (I5)$$

Точность замены по соотношениям (I4) и (I5) составляет 8% в области изменения $0 \leq X \leq 0,89$. Здесь:

$$X = Z \cdot d; \quad d = \frac{T_{\infty} - 273}{T_{\infty} - T_w} \quad (I6)$$

В правой части уравнения (I0) заменяем:

$$\frac{1 - m_{1\delta}}{1 - m_{1\infty}} \approx 1 + \frac{m_{1\infty}}{1 - m_{1\infty}} (D_1 Z^{0,9} - D_2 Z^{1,8}) \quad (I7)$$

Коэффициенты D_1 и D_2 зависят от физических свойств компонентов смеси и температуры насыщения ПГС в невозмущенном потоке. Для ПВС они могут быть определены по графику, представленному на рис. I. Удовлетворительное согласование с расчетами по таблицам термодинамических свойств формула (I7) дает в области значений $0 \leq Z \leq 0,55$. В области значений $Z \geq 0,55$ с погрешностью не более 7% можно принять:

$$\frac{1 - m_{1\delta}}{1 - m_{1\infty}} \approx \frac{1}{1 - m_{1\infty}} \quad (I8)$$

Вводим обозначения:

$$Q = \frac{m_{1\infty}}{(1-m_{1\infty})S_c^{1/4}}; \quad M_\infty = \frac{C_{pe} A (T_\infty - T_w)}{Z_e P_{Z_e}} \quad (19)$$

После подстановки (12)+(17) и (19) в уравнение (10) и несложных преобразований получаем квадратное уравнение. Разрешив его относительно температуры межфазной поверхности имеем:

$$T_d = T_\infty - (T_\infty - 273) \left[V - \sqrt{V^2 - H} \right]^{1/0.9} \quad (20)$$

где:

$$V = \frac{2,63 M_\infty^{1/6} d^{0.9} + 2 \left(\frac{9 A x \sin \varphi}{W_\infty^2} \right)^{0.45} M_\infty^{1/25} d^{0.9} + a D_1}{2 \left[0,87 M_\infty^{1/6} d^{1.8} + a D_2 \right]} \quad (21)$$

$$H = \frac{1,71 M_\infty^{1/6} + 1,9 \left(\frac{9 A x \sin \varphi}{W_\infty^2} \right)^{0.45} M_\infty^{1/25} + \frac{0,27}{S_c^{1/4}} + 0,08}{0,87 M_\infty^{1/6} d^{1.8} + a D_2} \quad (22)$$

Результаты расчетов по предлагаемой методике для различных смесей, различной ориентации поверхности конденсации и различных режимных параметров были сопоставлены с численными расчетами на ЭЦВМ Спэрроу и сотр., Дэнни и сотр. Расхождение с данными численных расчетов не превысило 10%. На рис.2 приведены некоторые результаты расчетов по предлагаемой методике в сопоставлении с расчетами Дэнни и сотр. Результаты расчетов по предлагаемой методике нанесены сплошной линией. В качестве неконденсируемого газа в смеси с NH_3 , CCl_2F_2 , C_2H_5OH , CCl_4 , H_2O служит воздух.

Третья глава посвящена описанию экспериментальной установки, методики измерения и обработки экспериментальных данных, определению погрешностей эксперимента.

Рабочим телом при проведении экспериментальных исследований служила смесь паров воды и воздуха (ПВС). Основными элементами экспериментальной установки являлись: парогенератор, вентилятор для подачи воздуха, входной участок, измерительный участок, ротаметры для измерения расхода пара, воздуха и охлаждающей воды, соединительные трубопроводы и контрольно-измерительные приборы. Непосредственно исследование теплообмена при

конденсации ПВС проводилось на измерительном участке. Он представлял собой канал прямоугольной формы размерами $0,08 \times 0,03$ м и длиной $0,45$ м, основным элементом которого служила измерительная пластина. Пластина изготавливалась из нержавеющей стали и имела размеры $0,08 \times 0,025 \times 0,45$ м. Для измерения величины теплового потока в тело пластины на расстоянии $2,5$ мм от поверхности конденсации в шести сечениях по её длине были заделаны д.т.п. батарейного типа. Со стороны охлаждающей воды они закрыты заглушками из того же материала, что и пластина. Датчики изготавливались и тарировались отдельно от пластины в ИТТФ АН УССР и имели следующие размеры: диаметр — 6 мм, высота $1,5$ мм. В связи с тем, что теплопроводность материала пластины отличалась от теплопроводности материала датчика, потребовалась дополнительная тарировка д.т.п. по месту их установки в пластину. Такая тарировка была выполнена с помощью специально изготовленного кондуктивного калориметра. Диапазон изменения теплового потока при тарировке составлял $(1 \pm 5) 10^4$ Вт/м². Измерение температуры поверхности пластины производилось хромель-копелевыми (ХК) термопарами, заделанными в тело пластины на тех же расстояниях от края, что и д.т.п. Температура потока ПВС на входе в измерительный участок поддерживалась близкой к состоянию насыщения и контролировалась ХК термопарами. Скорость и концентрация ПВС на входе в измерительный участок вычислялась по измеренным ротаметрами расходам пара и воздуха. Диапазоны экспериментально исследованных режимов составляют: по массовым концентрациям пара — $m_{i,\infty} = 0,75 \pm 0,99$; по скоростям ПВС — $w_{\infty} = 1,5 - 7$ м/с; по температурному напору — $T_{\infty} - T_w = 3 - 26$ К; по углу наклона пластины — $\varphi = 0 \div \pi/2$; давление ПВС — атмосферное; движение потока ПВС и пленки конденсата — спутное. В конце главы проведена оценка погрешностей измерения режимных параметров. Относительная погрешность измерения теплового потока составляла — $4,7\%$.

В четвертой главе диссертации проводится сопоставление полученных опытных данных с расчетными, а также проводится анализ результатов расчетного и экспериментального исследования. На рис. 3-5 представлены некоторые результаты экспериментов по определению локальных значений теплового потока в охлаждаемую пластину. Анализ представленных рисунков показывает удовлетвори-

тельное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Наибольшее отклонение экспериментально определенных величин теплового потока наблюдается при конденсации пара из ПВС на вертикальной пластине (рис. 5). Это расхождение вызвано изменением режима течения пленки конденсата, а именно: переходом из ламинарного плоского течения в ламинарно-волновой режим. Если воспользоваться данными Капицы по расчету теплообмена при возникновении ламинарно-волнового режима течения, то получим довольно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

На рис. 6 расчетная кривая и экспериментальные точки построены по данным рис. 5. При $Re < Re_{кр}$ расчетные значения q вычислялись по методике, предложенной в главе 2, а при $Re \geq Re_{кр}$ его расчетное значение увеличивалось в 1,21 раза. Величина соответствует тепловому потоку при конденсации чистого насыщенного пара и вычислялась по формуле Нуссельта. Значение q_{Nu}^* определялось следующим образом:

$$q_{Nu}^* = q_{Nu} \text{ при } Re < Re_{кр}; \quad q_{Nu}^* = 1,21 q_{Nu} \text{ при } Re \geq Re_{кр}.$$

На рис. 7, 8 в относительной форме представлены некоторые результаты расчетного и экспериментального исследования влияния отдельных параметров процесса на теплообмен при конденсации ПВС. Величина q_0 представляет собой тепловой поток, соответствующий тепловому потоку при конденсации чистого пара. Значение q_0 вычислялось по методике, предложенной в главе 2. Температура межфазной поверхности при расчете q_0 принималась равной температуре насыщения смеси в невозмущенном потоке ПВС. На этих рисунках наблюдается тенденция некоторого снижения теплоотдачи, по сравнению с конденсацией чистого насыщенного пара, при увеличении температурного перепада и угла наклона пластины по отношению к горизонту. Объяснение этого факта с физической точки зрения одинаковое для двух указанных случаев и связано с ростом интенсивности процесса конденсации. В первом случае рост интенсивности происходит за счет увеличения температурного напора $T_\infty - T_w$, во втором — за счет уменьшения толщины пленки конденсата. Рост интенсивности процесса конденсации приводит к увеличению конвективного потока пара в направлении к границе раздела фаз. Конвективное течение переносит неконденсирующийся газ также хорошо, как и пар, что вызывает увеличение

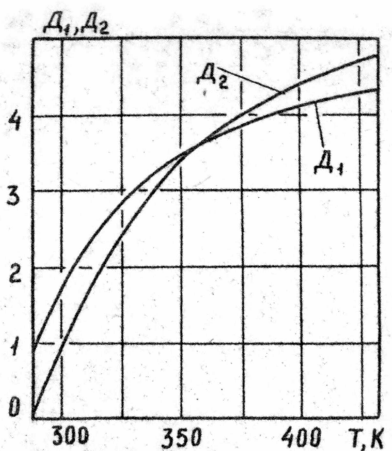


Рис.1. Значения коэффициентов D_1, D_2

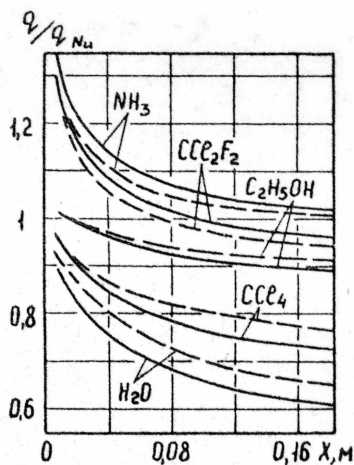


Рис.2. Теплообмен при конденсации ПГС на вертикальной пластине; $m_{1,\infty} = 0,99$; $w_\infty = 3,05$ м/с; $T_\infty = 310,9$ К; $T_w = 299,8$ К

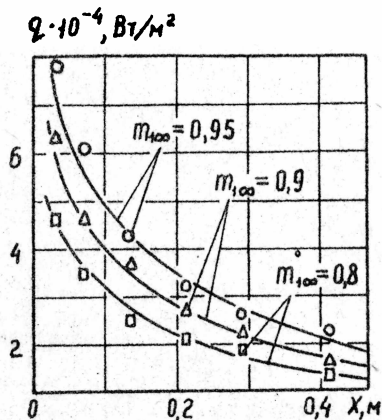


Рис.3. Теплообмен при конденсации ПГС на горизонтальной пластине; $\varphi = 0$; $w_\infty = 5$ м/с

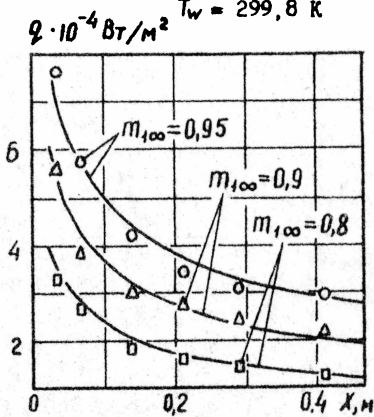


Рис.4. Теплообмен при конденсации ПГС на наклонной пластине; $\varphi = \pi/4$; $w_\infty = 3$ м/с

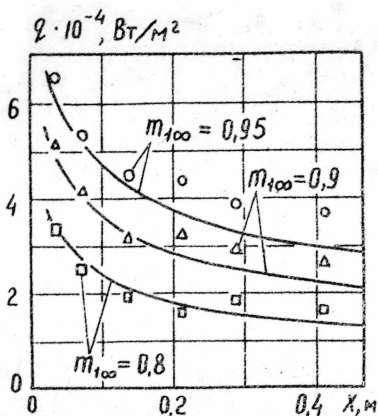


Рис.5. Теплообмен при конденсации ПВС на вертикальной пластине; $\varphi = \pi/2$; $W_{\infty} = 4,5$ м/с

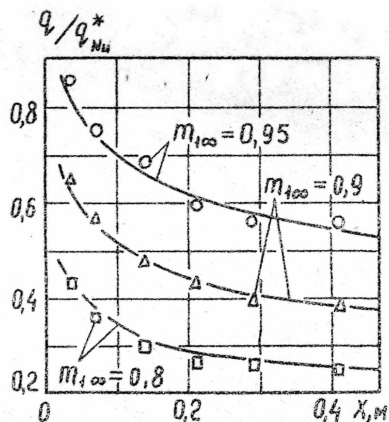


Рис.6. Теплообмен при конденсации ПВС на вертикальной пластине; $\varphi = \pi/2$; $W_{\infty} = 4,5$ м/с

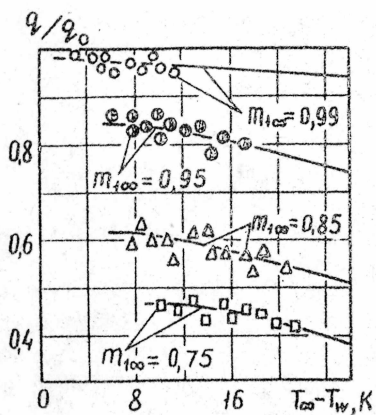


Рис.7. Влияние перепада температур на теплообмен при конденсации ПВС на горизонтальной пластине

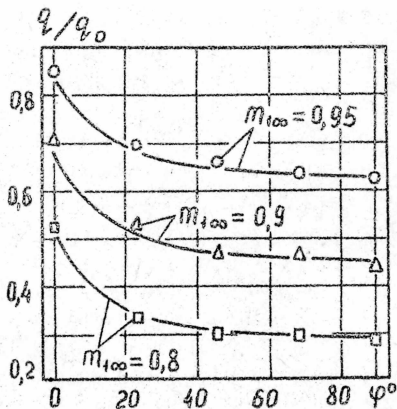


Рис.8. Влияние угла наклона пластины на теплоотдачу при конденсации ПВС; $W_{\infty} = 3$ м/с; $X = 0,07$ м.

его концентрации у границы раздела фаз. При этом температура межфазной поверхности снижается, соответственно снижается численное значение величины q/q_0 .

Полученные экспериментальные данные обобщались в координатах $\psi'_2 - \theta'_2$ и сравнивались с теоретическим решением Кутателадзе и Леонтьева. Отклонение результатов составляет не более 18%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета тепломассообмена при пленочной конденсации пара из вынужденного потока ПГС на произвольно ориентированной пластине. Течение в парогазовом пограничном слое и в пленке конденсата — ламинарное. Методика пригодна для расчета в области изменения значений:

- а) относительного закона массообмена $\psi'_2 \geq 1,23$;
- б) диффузионного параметра проницаемости $\theta'_2 \geq 0,3$.

2. Расчет тепломассообмена по предлагаемой методике ведется с учетом интенсивности процесса конденсации и динамического воздействия потока ПГС на движение пленки конденсата. Температура межфазной поверхности рассчитывается:

- а) в случае конденсации ПГС произвольного состава по трансцендентному уравнению;
- б) в случае конденсации паров воды из ПВС по явной аналитической зависимости.

3. Экспериментальное исследование локального теплообмена, проведенное с помощью датчиков теплового потока батарейного типа, показало удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с расчетами по разработанной методике. Диапазоны исследованных режимов составляют:

- а) по массовым концентрациям пара: $m_{\infty} = 0,75 \div 0,99$;
- б) по скоростям ПВС: $W_{\infty} = 1,5 \div 7$ м/с;
- в) по температурному напору: $T_{\infty} - T_w = 3 \div 26$ К;
- г) по углу наклона пластины: $\varphi = 0 \div \pi/2$;
- д) давление ПВС: P_{∞} — атмосферное.

4. Результаты расчетов теплообмена по предложенной методике удовлетворительно согласуются с результатами других авторов, полученными путем численных решений полной системы диффе-

ренциальных уравнений, описывающих процесс конденсации пара из ПГС.

5. Экспериментально и теоретически исследовано влияние различных параметров на интенсивность тепло- и массообмена при конденсации пара из ПГС. При увеличении скорости движения ПГС и концентрации пара интенсивность тепло- и массообмена растет, а с увеличением продольной координаты падает. Более резкое падение теплоотдачи с увеличением продольной координаты при одинаковых заданных параметрах наблюдается для горизонтально ориентированной поверхности конденсации. При увеличении угла наклона пластины от горизонтального положения до вертикального наблюдается некоторое уменьшение теплоотдачи по сравнению с конденсацией чистого пара.

6. Предложенная методика может быть использована при расчетах тепломассообмена в конденсационных устройствах паровых турбин, элементах конструкций регенераторов растворителей химической промышленности, систем опреснения соленой воды и т.д.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- X – продольная координата, м;
- φ – угол наклона пластины по отношению к горизонту;
- δ – толщина пленки конденсата, м;
- T – температура, К;
- w – скорость, м/с;
- m – массовая концентрация компонента;
- ρ – плотность, кг/м³;
- η – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
- ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
- λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;
- C_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К;
- γ – теплота парообразования, Дж/кг;
- R – газовая постоянная, Дж/кг·К;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;
- D – коэффициент диффузии, м²/с;
- q – плотность теплового потока, Вт/м²;

j - плотность потока массы, $\text{кг/м}^2 \text{ с}$;
 δ' - параметр проницаемости;
 ψ' - относительный закон при сопоставлении параметров по Re_x .

ИНДЕКСЫ

∞ - невозмущенный поток парогазовой смеси;
 δ - поверхность раздела фаз;
 w - охлаждаемая поверхность пластины;
 1 - конденсирующийся пар;
 2 - неконденсирующийся газ;
 D - диффузионный;
 ℓ - жидкая фаза;
 без индексов - газовая фаза;

ЧИСЛА ПОДОБИЯ

$Re = \frac{w \cdot x}{\nu}$ - Рейнольдса;
 $Nu_D = \frac{j \cdot x}{(m_{1\infty} - m_{1s}) D}$ - Нуссельта диффузионное;
 $Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda}$ - Прандтля; $Sc = \frac{\nu}{D}$ - Шмидта.

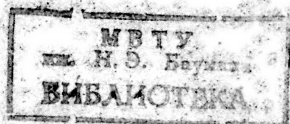
Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Волков Д.А., Никитин В.М., Школа В.В. О тарировке датчиков теплового потока по месту их установки для исследования процесса конденсации из парогазовой смеси. - Промышленная теплотехника, 1983, №1, с.26-29.
2. Волков Д.А., Никитин В.М., Школа В.В. Конденсация пара из движущейся парогазовой смеси на пластине. - IV Всесоюзная школа-семинар "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок": Тезисы докладов (по разделу "Газодинамика и теплообмен при течениях двухфазных сред"). М.: МВТУ, 1983, с.20.
3. Никитин В.М., Волков Д.А., Школа В.В. Расчет процесса конденсации из движущейся парогазовой смеси на горизонтальной пластине. - Изв.ВУЗов, Энергетика, 1983, №8, с.103-107.
4. Волков Д.А., Никитин В.М., Школа В.В. Теплообмен при кон-

денсации пара на пластине из движущейся парогазовой смеси.—
Всероссийная научная конференция "Проблемы энергетики теплотех-
нологий": Тезисы докладов, т.2, М.: МЭИ, 1983, с.41.

5. Шола В.В., Никитин В.М., Волков Д.А. Теплообмен при конденса-
ции пара из парогазовой смеси на произвольно ориентированной
пластине.— Представлена МВТУ им.Н.Э.Баумана, ДЕП в ВИНТИ,
1984, №215-84, 18 с.

В.В. Шола



Л- 83050 от 16.04.84 Заказ 748 Объем 1 п.л. Тираж 100экз.
Ротапринт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5
